

0- 779593

На правах рукописи



Боровских Игорь Викторович

ВЫСОКОПРОЧНЫЙ ТОНКОЗЕРНИСТЫЙ БАЗАЛЬТОФИБРОБЕТОН

05.23.05 – Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2009

Работа выполнена на кафедре технологии строительных материалов, изделий и конструкций в Казанском государственном архитектурно-строительном университете

Научный руководитель	доктор технических наук, профессор Хозин Вадим Григорьевич
Официальные оппоненты	доктор технических наук, профессор Бабков Вадим Васильевич доктор технических наук, профессор Габидуллин Махмуд Гарифович
Ведущая организация	Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Защита состоится « 8 » декабря 2009 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д212.077.01 Казанского государственного архитектурно-строительного университета по адресу: 420043, г. Казань, ул. Зеленая, 1, КГАСУ, ауд. 3-203 (зал заседаний Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного архитектурно-строительного университета. Автореферат размещен на сайте: <http://www.kgasu.ru>

Автореферат разослан « 5 » ноября 2009 г.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000644235

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н.

Абдрахманова Л.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Растущая потребность в высокопрочных бетонах обусловлена двумя факторами: во-первых, увеличением нагрузок на несущие и, особенно, пролетные конструкции высотных зданий, в которых тяжелый бетон классов В30-В50 уже не удовлетворяет конструктивным требованиям. К примеру, при возведении каркасов башен комплекса «Федерация», Москва-Сити, высотой 280 и 340м применялся бетон классов В80-90 общим объемом 86тыс.м3. Второй фактор – рост цен на все сырьевые материалы железобетона – выдвигает новый принцип бетонного строительства: «Экономить не цемент в бетоне, а бетон в конструкции». А это возможно только за счет уменьшения поперечных сечений несущих элементов, благодаря существенному росту прочности в них.

Однако применение высокопрочных бетонов влечет за собой ряд трудностей и рисков. Так, например, мелкозернистый бетон имеет недостаточную прочность на растяжение при изгибе, ее рост «отстает» от роста прочности на сжатие. К тому же высокопрочные бетоны требуют повышенного расхода цемента, что приводит к росту усадочных деформаций и внутренних напряжений, накоплению микродефектов, увеличивающих опасность хрупкого разрушения конструкций. Устранить эти недостатки высокопрочных бетонов можно с помощью фибры. Чаще всего в цементных бетонах применяется стальная фибра длиной 2-4см, диаметром 0,7-1мм при коэффициентах армирования 2,5-4% от массы бетона. Это приводит к увеличению прочности на изгиб на 15-20% и снижению внутренних напряжений. Однако, потенциал дисперсного армирования полностью не реализуется, ввиду малой удельной поверхности стальной фибры, невысокой адгезии к ней цементного камня и недостаточной прочности самого бетона, приводящей к «продергиванию» фибр при его разрушении.

В связи с этим привлекает внимание базальтовое волокно, практически еще не применяемое в цементных бетонах. По прочности оно превосходит сталь, и обладает, за счет малого диаметра волокон (9-12мкм), гораздо большей удельной поверхностью сцепления с цементным камнем, чем стальное, имея с ним химическое сродство. При этом относительное удлинение при разрыве базальтовой фибры в два раза ниже, чем стальной, что позволяет ей более эффективно препятствовать образованию микротрещин в бетоне при нагружении.

В настоящее время по критерию прочности при сжатии бетоны подразделяют на 4 группы*: I – рядовые, с прочностью до 40 МПа; II – высокопрочные бетоны (40-80 МПа); III – особо высокопрочные (80-120 МПа); IV – сверхвысокопрочные бетоны (более 120 МПа). Получение особо- и сверхвысокопрочных бетонов возможно путем модифицирования цементного камня и повышения плотности упаковки мелкозернистого и тонкозернистого заполнителей. При этом дисперсное волокно должно быть распределено именно в тонкозернистой структуре бетона и эффективно взаимодействовать с цементным камнем для обеспечения высокой адгезии и прочности материала на растяжение и увеличения его трещиностойкости.

* - Е.М. Чернышов, Д.Н. Коротких. Высокотехнологичные и высокопрочные бетоны: вопросы управления их структурой // материалы международного конгресса «Наука и инновации в строительстве», Современные проблемы строительного материаловедения и технологии, т.1, книга 2 – Воронеж: ВГАСУ, 2008 – С.616-620.

Сочетание тонкозернистых бетонов с дисперсным базальтовым волокном может создать основу для получения особо высокопрочных материалов и обеспечения высокой технико-экономической эффективности и конкурентоспособности конструкций на их основе.

Цель работы.

Разработка составов и технологии получения особовысокопрочных тонкозернистых цементных бетонов, дисперсно-армированных базальтовым волокном.

Для ее достижения были поставлены следующие задачи:

1. изучить химическую стойкость базальтового волокна в щелочной среде гидратирующегося портландцемента, установить влияние на нее активных пуццолановых добавок и различных пластификаторов;
2. разработать оптимальный технологический способ введения в цементную матрицу базальтового волокна и оценить его влияние на реологические свойства цементного теста и физико-механические свойства цементного камня;
3. обосновать и выявить эффективность фракционирования заполнителя в тонкозернистом бетоне;
4. предложить топологическую модель структуры тонкозернистого бетона с оптимальной степенью дисперсного армирования коротким базальтовым волокном.;
5. оптимизировать составы тонкозернистых смесей, содержащих базальтовую фибру, позволяющих достичь максимальных физико-механических свойств, предъявляемых к особовысокопрочным бетонам.

Научная новизна.

1. Установлена высокая эффективность применения короткого (до 9 мм) тонкого ($\Phi 10 \text{ мкм}$) базальтового моноволокна в качестве дисперсно - армирующего компонента особовысокопрочных тонкозернистых цементных бетонов (класса В90 и выше), обеспечивающего высокую прочность на изгиб и растяжение;
2. Выявлен характер химического взаимодействия базальтового волокна с раствором $\text{Ca}(\text{OH})_2$ гидратирующего цемента и степень его влияния на прочность при разрыве (снижение на 8% за 10лет). Установлена возможность ослабления и предотвращения негативного влияния гидратной извести на прочность базальтового волокна путем введения тонкодисперсного микрокремнезема, химическая активность которого в десятки раз выше;
3. Выявлены закономерности и количественные зависимости снижения длины волокна при его совместном смешении-помоле с портландцементом и суперпластификаторами при изготовлении композиционного вяжущего. Установлено положительное влияние различных пластификаторов на сохраняемость волокна при этом процессе;
4. Предложена топологическая модель распределения базальтового волокна в каркасе тонкозернистого бетона. С учетом максимальной упаковки зерен заполнителя в элементарной кубической ячейке, произведен расчет количественного содержания волокон в объеме тонкозернистого бетона, совпадающего (с погрешностью не более 1%) с дозировкой волокна (4% от массы вяжущего).

го), полученной из экспериментальных данных.

Практическая значимость работы:

1. Разработаны составы и технология приготовления особовысокопрочных базальтофибробетонов с применением короткого волокна из рубленного ровинга, отличающиеся высокой прочностью на изгиб и растяжение (отношение $R_{изг}:R_{сж}=1:4$; $R_{рвск}:R_{сж}=1:5$;) с хорошими технологическими свойствами;

2. Установлены зависимости деформационных свойств базальтофибробетона от содержания волокна (модуль упругости, коэффициент Пуассона, призмная прочность), позволяющие проектировать составы для несущих конструкций;

3. Опытнo-промышленные испытания базальтофибробетона при изготовлении перемычек без стержневого армирования и буроньекционных свай показали высокую техническую и экономическую эффективность его применения.

Достоверность результатов экспериментальных исследований и выводов обеспечена:

- соответствием полученных результатов с общими положениями физико-химии и структурообразования цементных композиций;
- использованием поверенного испытательного оборудования при испытании материалов и современных методов исследования структуры и свойств цементного камня (РФА, ДТА, растровая электронная микроскопия, потенциометрия) и статистической обработкой результатов измерений. Корреляций результатов, полученных разными методами.

Внедрение результатов.

Полученные в ходе исследований составы тонкозернистого базальтофибробетона использованы: при изготовлении буроньекционных свай усиления фундаментов жилого дома в г.Казань; при изготовлении надоконных брусовых перемычек без стержневого армирования сталью.

Апробация работы.

Представленные в диссертации результаты исследований докладывались на: ежегодных республиканских научных конференциях Казанского государственного архитектурно-строительного университета (2005-2009 г.г.), конференции «Региональные аспекты стратегии развития транспорта» (Казань, 2006г.), Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Теория и практика повышения эффективности строительных материалов» (Пенза, 2006г), III Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в проектировании и производстве изделий машиностроения» ИТМ-2008 (Казань, 2008г), Международной научно-практической конференции «Строительный комплекс России: Наука, образование, практика» (Улан-Удэ, 2008г), Международном конгрессе «Наука и инновации в строительстве», (Воронеж, 2008).

Публикации. Результаты исследований, отражающие основные положения диссертационной работы, изложены в 9 научных публикациях (в том числе в журналах по списку ВАК РФ – 2 статьи).

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, основных выводов,

списка используемых источников из 180 наименований и 2 приложений. Содержит 162 страницы машинописного текста, в том числе 52 рисунка, 34 таблицы.

Работа выполнена на кафедре технологии строительных материалов, изделий и конструкций Казанского государственного архитектурно-строительного университета под руководством доктора технических наук, профессора В.Г. Хозина. Автор благодарит к.т.н., ст. преподавателей кафедры Хохрякова О.В. и Морозова Н.М. за ценные замечания и помощь при выполнении диссертации, а также всех коллег по кафедре ТСМИК за доброжелательность и постоянное внимание.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель и задачи исследования, научная новизна работы и ее практическая значимость.

В первой главе представлен анализ литературных данных о фибробетонах в России и за рубежом.

Мировые тенденции строительства зданий с повышенной этажностью и других высоконагруженных сооружений, таких как больше пролетные мосты, морские нефтяные платформы и др., связаны с применением бетонов с ранее недостижимым комплексом свойств, включающих: высокую прочность (класс В80 и выше), трещиностойкость и долговечность, с большой подвижностью исходной бетонной смеси.

К настоящему времени сверхвысокопрочные бетоны по фракционному составу заполнителей можно разделить на два вида: мелкозернистые бетоны с максимальной крупностью зерна 5,0-1,6мм и тонкозернистые бетоны с размером зерна менее 1,5мм. Однако мало сведений о фракционном составе рекомендуемых заполнителей. В основном речь идет о применении различных видов суперпластификаторов и их влиянии на технологические свойства смесей. Для повышения прочности на растяжение, трещиностойкости, ударной прочности рекомендуется фибра: стальная, стеклянная и полимерная.

Мировая практика строительства выявила фибробетон как один из перспективных строительных материалов XXI века. Опыт США, Великобритании, Японии, Германии, Италии, Франции и Австралии убедительно показал технико-экономическую эффективность применения фибробетона в строительных конструкциях и сооружениях. Возрос объем научно-технических публикаций, посвященных различным аспектам дисперсного армирования строительных материалов.

Над созданием дисперсно-армированных бетонов и конструкций на их основе, теорий расчета и проектирования фибробетонных конструкций работали отечественные и зарубежные ученые: В.В. Бабков, Ю.М. Баженов, О.Я. Берг, Г.П. Бердичевский, В.М. Бондаренко, И.В.Волков, А.А. Гвоздев, Ю.В. Зайцев, Л.Г. Курбатов, Б.А. Крылов, И.А. Лобанов, К.В., Михайлов, Р.Л. Маилян, Л.Р. Маилян, Р.А. Малинина, Ю.В. Пухаренко, Ф.Н. Рабинович, Б.Г. Скрамтаев, Т.К. Хайдуков, М.М. Холмянский, В.П. Харчевников, Ф.П. Янкевич, Е.М. Чернышов и зарубежные ученые - Э. Ву, Г.С. Холистер, СТ. Милейко, Дж. Купер и др.

При выборе материала фибры для цементных бетонов необходимо учитывать возможность и негативные последствия его химического взаимодействия с

щелочной средой цементной матрицы. В частности, стеклянные волокна обычного состава подвергаются в ней интенсивной коррозии: на поверхности волокон образуются раковины, рекомендуются более дорогие, но стойкие алюмоборосиликатные стекла.

Данные о стойкости базальтового волокна в щелочной среде довольно противоречивы. По некоторым, его прочность в цементных бетонах не изменяется в течение всего срока эксплуатации. По другим – разрушается в цементном камне в течение 3 лет.

Базальтофибробетон по сравнению со сталефибробетоном (при условии разработки оптимальных способов распределения волокна в матрице и достижении высоких показателей физико-механических свойств самой матрицы) сможет обладать более высокой прочностью и жесткостью, т.к. базальтовое волокно может обеспечить более высокую степень дисперсного армирования цементного камня и обладает более высокой прочностью (1,9-3,9 ГПа) чем стальная фибра (1,2-3,1 ГПа). Кроме того, базальтофибробетон сможет переносить большие упругие деформации потому, что базальтовое волокно при растяжении пластических деформаций практически не имеет, а по модулю упругости ($E=150$ ГПа) превосходит модуль упругости высокопрочных бетонов в 3 раза. При этом плотность базальтовых волокон ($3100-3300 \text{ кг/м}^3$) почти в 2,5 раза меньше, чем стальных (7850 кг/м^3), что облегчит конструкции из фибробетона. Благодаря малой толщине волокон (10-12 мкм) которая в 10 раз меньше минимального диаметра стального волокна, применяемого на сегодняшний день, удельная поверхность сцепления с цементной матрицей может достигать до $100000 \text{ м}^2/\text{кг}$, в зависимости от дозировки волокна в цементной системе. Кроме того, ни одна из модификаций других известных волокон не обладает такой широкой сырьевой базой и простотой технологической схемы переработки базальтового щетня в тонкое волокно.

До настоящего времени применение базальтофибробетона в изделиях и конструкциях сдерживалось рядом причин: отсутствием нормативной базы по их проектированию и расчету, и технологий производства строительных конструкций из бетонных смесей, содержащих базальтовые волокна. Промышленного производства базальтофибробетонов пока нет и ввиду отсутствия нормативных документов, устанавливающих требования к самому базальтовому волокну, как к дисперсной арматуре бетонов.

Анализ состояния исследований свидетельствует о скудности данных о тонкозернистых дисперсно-армированных высокопрочных бетонах и отсутствии исследований, связанных с разработкой высокопрочных базальтофибробетонов. Получение последних целесообразно осуществлять поэтапно, начав с разработки высокопрочных тонкозернистых бетонных матриц, а затем оптимизировать технологию их дисперсного армирования базальтовым волокном, открыв дорогу новому типу экономически эффективных и конкурентоспособных особо и сверхвысокопрочных базальтофибробетонов.

Во второй главе приводится характеристика материалов и методов исследований.

Использован портландцемент ПЦ500Д0 производства ОАО «Вольскце-

мент», кварцевый песок Камского месторождения ПО «Нерудматериалы», удовлетворяющий требованиям ГОСТ 8736-93, суперпластификаторы: С-3 (Россия), Melment F15 (Германия) и Melflux 2651F (Германия). В качестве минеральных наполнителей использовали микрокремнезем марки МК-85 Липецкого МК и «СилиномДБС» (ТУ 5870-041-13002578-02), производимый ООО «Силином» (г.Ульяновск).

В качестве дисперсной арматуры использовалось: базальтовое моноволокно диаметром 10мкм полученное из базальтового ровинга (комплексной нити из непрерывного базальтового волокна) производства ООО «Каменный век» (г. Дубна), а также штапельные волокна, полученные при производстве теплоизоляционных матов (ООО «СМП-МЕХАНИКА», с. Столбище, РТ). Химический состав используемых волокон представлен в табл.1.

Таблица 1

Химический состав базальтовых волокон

Волокно	Содержание окислов, %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃ +TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O+K ₂ O	п.п.п
Волокно из рубленного базальтового ровинга	50,29	16,22	14,89	13,90	2,88	2,04	-
Штапельное волокно для матов	56,16	14,11	0,12	17,26	4,57	0,44	7,34

Удельную поверхность сухих дисперсных наполнителей определяли с помощью прибора ПСХ-12. Их пуццоланическую активность оценивали по поглощению СаО из насыщенного раствора в течении 30 суток. Определение рН-среды гидратирующегося цемента с модификаторами и без них осуществляли потенциометрическим методом на милливольтметре рН-213 производства HANNA Instruments.

Для определения реологических свойств цементных суспензий, содержащих базальтовое волокно, в вязкопластичном состоянии использовали ротационный вискозиметр РВ-8 конструкции Волоровича М.П. Пластифицирующий эффект и водоредуцирующее действие добавок оценивалось по методике, разработанной на кафедре ТБКиВ Пензенского ГУАС и по ГОСТ 30459-2003.

Фазовый состав новообразований цемента определяли на рентгеновском дифрактометре D8ADVANCE (фирма Bruker) и на модернизированной установке «ДЕРИВАТОГРАФ» Q1500D. Структуру цементного камня изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа РЭМ-100У, а также с помощью лабораторного поляризационного микроскопа «Axioskop» 40 Pol.

Прочность на сжатие цементного камня, содержащего базальтовое волокно, определяли на образцах 20х20х20мм. Прочность при изгибе определяли на образцах-брусках 20х20х80мм.

Прочность на растяжение при раскалывании определяли в соответствии с ГОСТ 10180-90, на образцах-кубиках 20х20х20мм по формуле:

$R_n = \gamma \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot A}$; F- разрушающая нагрузка на образец; A - площадь рабочего сечения образца; γ -масштабный коэффициент приведения к образцам базовых размера и формы.

Плотность тонкозернистого бетона определяли в соответствии с методиками ГОСТ 12730.0-78. Прочность при сжатии, изгибе определяли согласно

методике ГОСТ 10180-90.

Третья глава посвящена оценке стойкости базальтового волокна в цементной матрице, технологии его введения и влиянию на прочность цементного камня.

Применение конструкций из базальтофибретона целесообразно только при условии долговременного сохранения базальтового волокна в бетоне. В связи с этим было исследовано влияние взаимодействия базальтового волокна с насыщенным раствором гидроксида кальция ($pH=12,15$) и средой гидратирующегося портландцемента ($pH=12,13$). Установлено, что базальтовое рубленое моноволокно, предварительно выдержанное в первой агрессивной среде в течение 3 лет при $20^{\circ}C$ и при 4 часовом кипячении в ней (что соответствует по данным Пащенко А.А. 10 годам нахождения в среде бетона) мало меняет свои армирующие свойства – прочность составов с испытанным волокном меньше прочности идентичных составов с исходным волокном не более чем на 10% (рис.1.). Прямые испытания прочности базальтового ровинга на разрыв после кипячения в насыщенном растворе извести (рис.2.) обнаружили снижение на 8%.



Рис.1. Прочность на растяжение при раскалывании ЦК, дисперсно-армированного БВ (3%) в возрасте 28сут. нормально-влажных условий хранения.

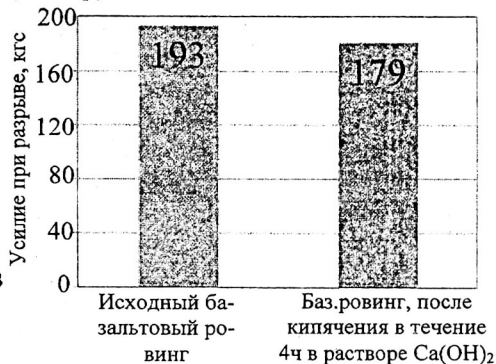


Рис.2. Прочность жгутов базальтового волокна на растяжение при разрыве.

Вводя в цементное вяжущее активные пуццолановые добавки: микрокремнезем МК-85 и Силином-ДБС, способные связывать образующийся $Ca(OH)_2$, можно, очевидно, снизить опасность разрушения базальтового волокна в среде твердеющего цемента. Исходя из уравнения химической реакции извести с кремнеземом, установлена оптимальная дозировка добавки МК-85 в количестве 10% от массы цемента, необходимой для предотвращения выщелачивания оксида кремния из базальтового волокна.

Для оценки влияния базальтового волокна и микрокремнезема на структуру цементного камня исследован его фазовый (минералогический) состав.

Рентгенограммы продуктов гидратации ПЩ в 28сут. возрасте указывают на снижение активности пиков портландита $Ca(OH)_2$ (4,93, 2,63, 1,93 Å и др.) при введении базальтового волокна (4%) как на 1, так и 28 суток в 1,16 и 1,26 раза, соответственно. При введении в состав МК-85 (10%) базальтовое волокно не прояв-

ляет своей активности, что проявляется в идентичности пиков портландита составов, с МК-85 и с МК-85 плюс базальтовое волокно на 28 суток нормальных условий хранения.

На микрофотографиях контактной зоны базальтового волокна с цементным камнем (рис.3) в возрасте 90 суток видно, что в составе, содержащем МК-85, поверхность волокна более гладкая, граничная зона довольно четкая в отличие от размытой граничной зоны базальтового волокна без присутствия МК-85. Таким образом, активный микрокремнезем, подавляя реакцию взаимодействия гидратной извести с БВ, сохраняет его поверхность и армирующее действие.

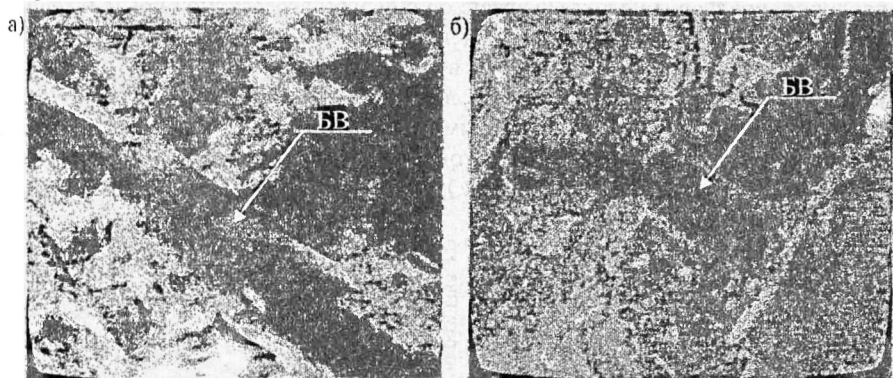


Рис. 3. Микрофотографии поверхности скола цементного камня (x2500) в возрасте 90 суток: а) - с 10% МК-85; б) - без добавления МК-85.

Известной технологической проблемой всех фибробетонов является трудность равномерного распределения волокон в объеме цементного теста и бетона. Стальная фибра образует так называемые «ежи», другие – агрегаты (или комки), состоящие из хаотически переплетенных волокон и частиц цемента.

Были опробованы различные способы введения базальтовой фибры в цементное тесто. Лучшим оказался способ предварительного сухого смешения цемента с волокном в мельнице: пружинной или шаровой. Как видно из кривых на рис.4, введение волокна в ЦТ порциями при перемешивании увеличивает водопотребность ЦТ. Смешение-помол Ц с БВ вызывает эффект уменьшения водопотребности ЦТ по сравнению с простым смешением.

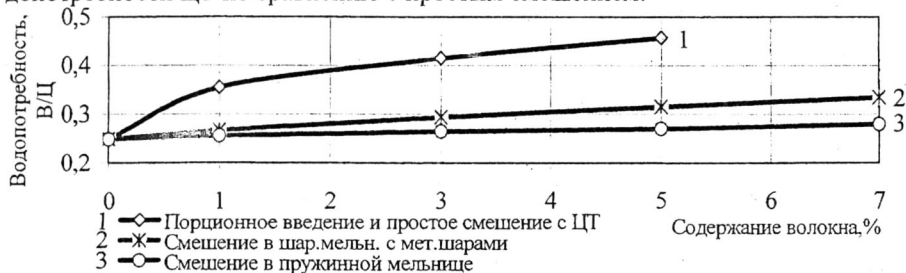


Рис.4. Зависимость водопотребности цементного вяжущего от содержания БВ.

Вполне очевидно, что при смешении БВ, тем более, с помолом в мельнице, абразивность цементных зерен и других компонентов композиционного вяжущего будет вызывать не только разрушение комков, но и измельчение волокон, в первую очередь, по длине. При совместном помоле базальтового волокна (4%) с цементом и разными суперпластификаторами (рис.5) лучший результат показал состав с добавлением 1% Melflux 2651F. Финишное время разрушения агрегатов БВ с Ц снизилось до 50с. Сохраняемость волокна составила 96%, меньше для коротких волокон.

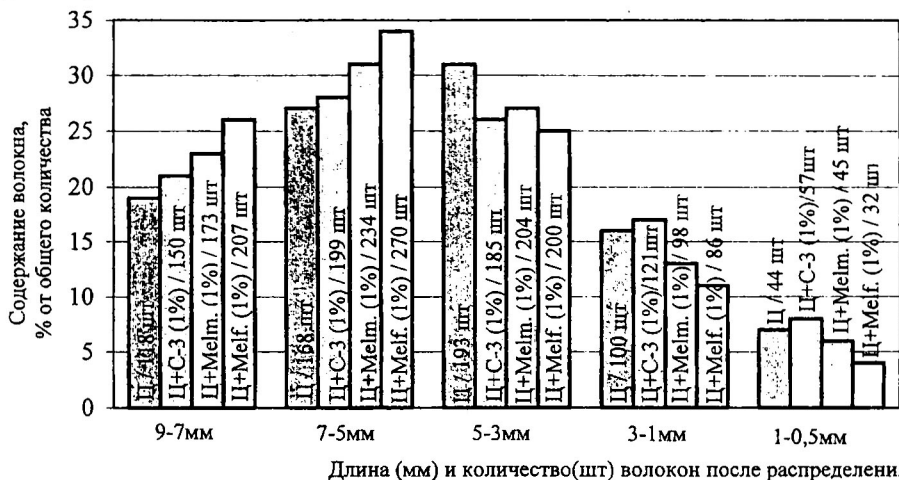


Рис.5. Распределение длины базальтовых волокон при смешении-помоле в присутствии различных суперпластификаторов.

Дисперсно-волоконистое армирование бетонов, естественно, должно вызывать повышение вязкости и снижение технологических свойств цементного теста.

Изменение его структурной вязкости в зависимости от напряжения сдвига и содержания БВ с суперпластификаторами представлено на рис.6. Кривые вязкости типичны для воднодисперсных систем коагуляционного типа, каковыми являются цементные композиции. С увеличением τ в определенном интервале, наблюдается переход (снижение) вязкости неразрушенной структуры к вязкости разрушенной. При этом, в обоих случаях, введение базальтового волокна увеличивает вязкость в 2-3 раза, резко сдвигая интервал перехода в сторону больших напряжений сдвига. Суперпластификаторы С-3, Melment и Melflux сдвигают кривые влево-вниз, т.е. сильно снижают структурную вязкость цементного теста с БВ. Характерно, что только суперпластификатор Melflux 2651F снижает вязкость разрушенной структуры цементного теста с фиброй ниже уровня исходного ЦТ, правда, при больших напряжениях сдвига.

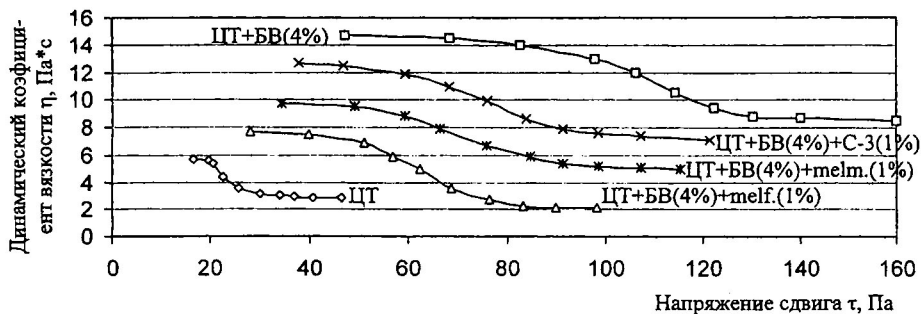


Рис.6. Зависимость структурной вязкости (η) модифицированного цементного теста от напряжения сдвига (τ).

Однако, главная цель нашей работы – повышение прочности бетона с помощью базальтовой фибры. На рис.7-9 представлены концентрационные зависимости прочности ЦК при сжатии, изгибе, раскалывании.

Все кривые имеют экстремальный характер с максимумами прочности при 4-5% БВ; при этом роль вида и концентрации суперпластификатора очень существенна. Наилучшие результаты показал состав с 2% суперпластификатора Melflux и 5%БВ, как показано на рис.7-9. Упрочнение волокном пластифицированного цементного камня на сжатие составило 40%, но гораздо интереснее упрочнение при изгибе и раскалывании, которое составляет 180% в обоих случаях. Следует обратить внимание на упрочнение при «чистом» растяжении (раскалывании ЦК), которое в 4,5 раза превышает упрочнение при сжатии. И это логично, т.к. вклад волокна в прочность на растяжение в этом случае непосредственен, по сравнению с сопротивлением материала на сжатие. Превышение прочности ЦК с БВ и Melflux над прочностью исходного цементного камня составляет на сжатие 65%, на растяжение при изгибе и растяжении при раскалывании в 2 и 2,2 раза, соответственно.

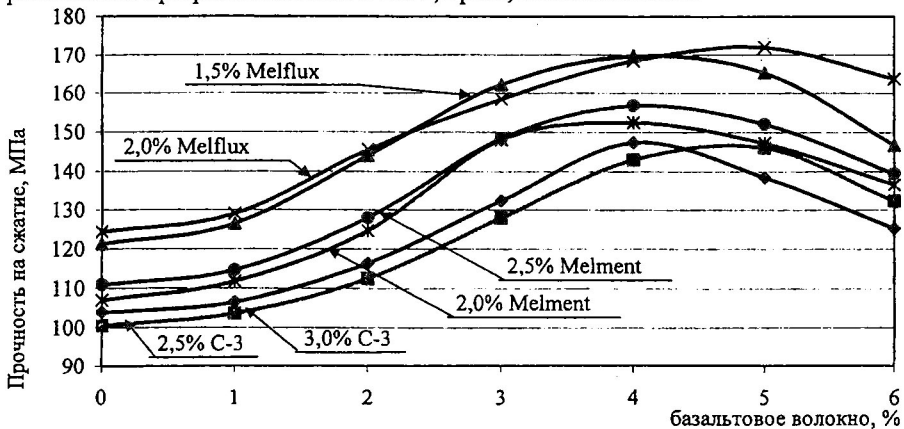


Рис.7. Прочность на сжатие пластифицированного ЦК (28 сут.), армированного базальтовым волокном.

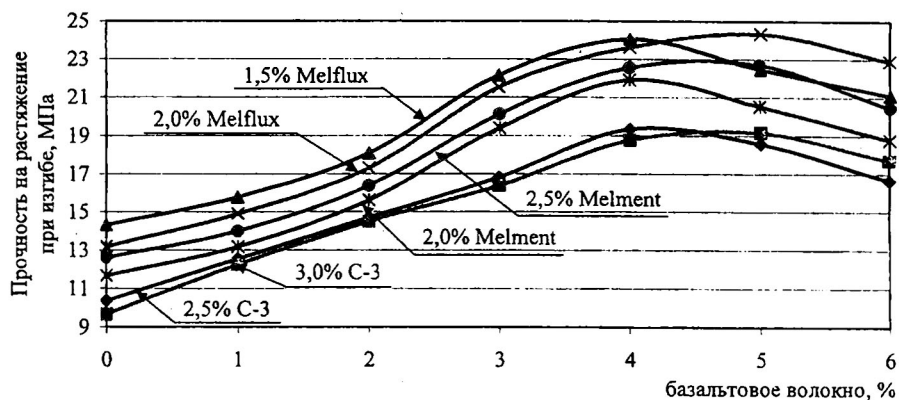


Рис. 8. Прочность на изгиб пластифицированного ЦК (28 сут.), армированного базальтовым волокном.

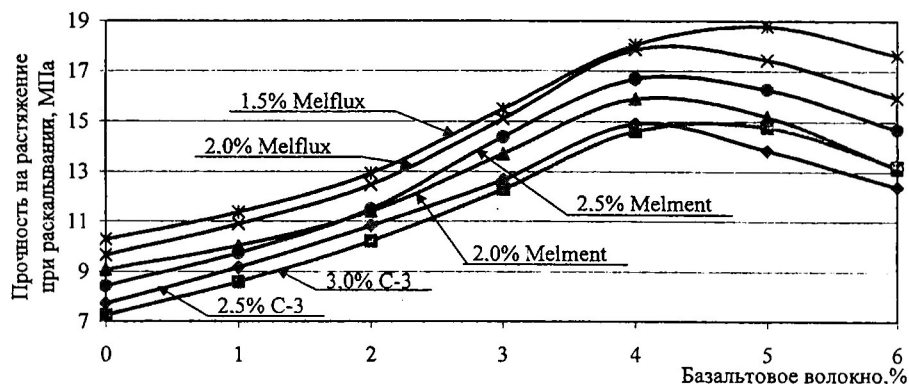
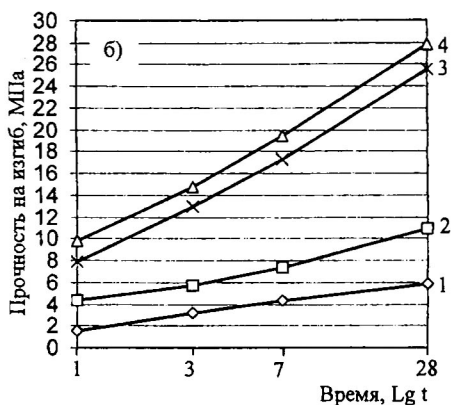
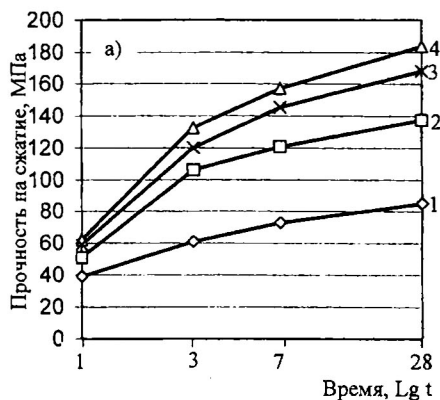


Рис. 9. Прочность на растяжение при раскалывании пластифицированного ЦК (28 сут.), армированного базальтовым волокном.

Следующий резерв упрочнения вяжущего – тонкодисперсные активные наполнители: микрокремнезем МК-85 и Силином-ДБС. Положительное влияние этих минеральных добавок, видно на кинетических зависимостях прочности при сжатии и изгибе, представленных на рис. 10, 11 в полулогарифмических координатах.

Лучшие результаты показывает композиционное вяжущее, содержащее 10% МК-85, 2% суперпластификатора Melflux и 5% БВ, по сравнению с композициями, наполненными Силином-ДБС. Нормативная, т.е. 28суточная, прочность равна 182 МПа при сжатии, при изгибе 27,6 МПа. Соотношение $R_{изг}/R_{сж}=1:6$, у исходного ПЦ 1:12. Характерно, что скорость набора прочности при изгибе выше, чем при сжатии, что хорошо согласуется с данными рис. 7-9.



- 1 – исходный портландцемент
 2 – с добавлением 2% Melf, 10% МК-85
 3 – с добавлением 2% Melf, 10% Силином-ДБС, 5% БВ
 4 – с добавлением 2% Melf, 10% МК-85, 5% БВ

Рис.10. Кинетика роста прочности на сжатие (а) и изгиб (б) цементного камня, модифицированного активными наполнителями (МК-85 или Силином-ДБС) 10%, суперпластификатором Melflux 2651 и БВ 5%.

Таким образом, разработан состав и технология приготовления композиционного механоактивированного вяжущего с дисперсно-волоконистым модификатором, обладающего высокими показателями прочности при изгибе и сжатии.

В четвертой главе проведена оптимизация технологии получения высокопрочных тонкозернистых бетонов, армированных базальтовым волокном.

Как известно, роль гранулометрического состава заполнителя в формировании физико-механических свойств бетонов очень высока. Использовать при этом рекомендуется фракционированный песок с крупностью до 1,0мм. Одним из условий получения бетонов высокой прочности является минимальная пустотность и однородность его структуры, достигаемая исключением грубой зернистости и подбором соответствующих фракций.

При оптимизации зернового состава заполнителя тонкозернистого бетона был использован песок Камского месторождения, производства ПО «Нерудматериалы» г.Казань, который был рассеян на четыре фракции: 1,25-0,63, 0,63-0,315, 0,315-0,14, 0,14-0,063. Путем регулирования их весового соотношения были получены составы с наибольшей плотностью, т.е. с максимальной упаковкой зерен (составы 6 и 11 табл.2).

Таблица 2 (начало)

Свойства фракционированных песков									
№, п/п	Содержание фракций, %				Плотность, кг/м ³		Пустотность, %		Удельная поверхн. по Ландис-кому, см ² /г
	1,25-0,63	0,63-0,315	0,315-0,14	0,14-0,063	насыпная	уплотн. в виде	насыпная	уплотн. в виде	
1	Исх. кварц. песок				1605	1775	39,4	33	23,1
	33	37	24	6					
2	100	-	-	-	1520	1680	46,4	40,3	19,80

Таблица 2 (продолжение)

Свойства фракционированных песков

№, п/п	Содержание фракций, %				Плотность, кг/м ³		Пустотность, %		Удельная поверхн. по Ладинскому, см ² /г
	1,25-0,63	0,63-0,315	0,315 - 0,14	0,14-0,063	насыпная	уплотн. виде	насыпная	уплотн. виде	
3	-	100	-	-	1550	1692	45,2	40,0	30,60
4	-	-	100	-	1535	1737	46,0	38,4	79,20
5	-	-	-	100	1390	1641	51,3	41,8	158,40
6	70	-	10	20	1706	1906	39,6	32,0	49,50
7	60	-	-	40	1694	1821	40,0	31,3	59,40
8	60	10	10	20	1702	1835	38,4	30,9	55,44
9	60	-	20	20	1694	1812	40,0	31,6	59,40
10	60	10	30	-	1691	1846	40,0	34,3	39,60
11	60	-	10	30	1727	1953	38,8	30,1	67,32
12	50	30	10	10	1691	1882	40,0	32,8	45,54
13	50	10	20	20	1718	1880	36,2	29,0	61,38

Обработка массива экспериментальных данных (из 47 составов песка) методами регрессивного анализа с помощью программного комплекса MathCad выявила два оптимальных (расчетных) состава песка: по насыпной плотности и в уплотненном виде 1966 и 2170 кг/м³, представленных в табл.3. Фактические значения плотности песков, составленных из 4^х фракций, равны 1810 и 1910 кг/м³ соответственно (на 8,6 и 10% ниже).

Таблица 3

Оптимальная расчетная гранулометрия песка

Насыпная						В уплотненном виде					
Содержание фракций, %				Плотность, кг/м		Содержание фракций, %				Плотность, кг/м	
1,25-0,63	0,63-0,315	0,315 - 0,14	0,14-0,063	Расч.	Факт.	1,25-0,63	0,63-0,315	0,315 - 0,14	0,14-0,063	Расч.	Факт.
64,4	6,7	24,9	4	1966	1810	64,1	12,1	22,8	1	2170	1910

На исходном (природном), трехфракционных (6^я и 11^я) и расчетном (4^х фракционном) составах были изготовлены тонкозернистые бетоны с соотношением Ц:П=1:2 при почти равном распыле конуса (табл.4).

Таблица 4

Свойства тонкозернистого бетона

№ п/п	Фракционный состав песка				В/Ц	распыл. конуса, мм	Прочность после 7 суток нормального твердения, МПа		Прочность после 28 суток нормального твердения, МПа	
	1,25-0,63	0,63-0,315	0,315 - 0,14	0,14-0,063			при изгибе	на сжатие	при изгибе	на сжатие
1	Не фракцион.				0,36	113	5,81	40,1	6,75	52,0
33		37	24	6						
6	70	-	10	20	0,31	111	8,49	54,5	10,71	64,4
11	60	-	10	30	0,33	112	8,38	44,8	10,56	68,3
Расч	65	5	25	5	0,30	112	9,26	58,3	12,91	76,0

Прочность при изгибе песчаного бетона на расчетном составе песка по сравнению с нефракционированным возросла в 1,9раза, на сжатие в 1,5раза. На 15-20% она оказалась выше прочности бетонов на оптимальных составах песка 6 и 11.

В табл.5 представлены массовый и объемный расход каждой из четырех фракций песка расчетного состава и единичные объемы зерен этих фракций.

Таблица 5

Фракционные показатели песка в тонкозернистом бетоне.

Фракция песка	Содержание на 1м ³ тон- козернистого бетона, % / кг ₁₅	Объем песка в 1м ³ тон- козернистого бетона, %	Усредненный объем единичного зерна, см ³
1,25 – 0,63	65 / 923	35	4,3*10 ⁻⁴ см ³
0,63 – 0,315	5 / 71	2,7	5,8*10 ⁻⁵ см ³
0,315 – 0,14	25 / 355	13,4	0,6*10 ⁻³ см ³
0,14 – 0,063	5 / 71	2,7	0,2*10 ⁻⁶ см ³

Исходя из этих данных, была построена идеализированная кубическая модель наиболее плотной упаковки зерен кварцевого песка с размером грани 1,35мм и расположения в ней базальтового волокна и произведен расчет количественного содержания его в объеме тонкозернистого бетона, совпадающего (с погрешностью 15%) с оптимальной дозировкой (4% от массы вяжущего), полученного из экспериментальных данных.

Далее были испытаны составы тонкозернистого бетона на оптимальном составе песчаного заполнителя, одинаковом соотношении Ц:П, добавке МК-85 – 10% от массы цемента и разных соотношениях БВ и гиперпластификатора Melflux, (табл.6). Прочностные показатели представлены на гистограммах Рис.12.

Таблица 6

Составы тонкозернистого бетона на фракционируемом заполнителе

№ п/п	Цемент, кг/м ³	Кварц, песок, кг/м ³	МК-85, % от массы Ц кг/м ³	Melflux 2651F, % от массы Ц кг/м ³	БВ, % от массы Ц кг/м ³
1	710	1460	-	-	-
2	710	1460	10 / 71	1,0 / 7,1	-
3	710	1460	10 / 71	1,0 / 7,1	1% / 7,1
4	710	1460	10 / 71	1,5 / 10,7	3% / 21,3
5	710	1460	10 / 71	1,5 / 10,7	4% / 28,4
6	710	1460	10 / 71	2,0 / 14,2	5% / 35,5

Дисперсное армирование увеличивает водопотребность, несмотря на увеличение доли гиперпластификатора (составы 3,4,5). Однако растут при этом и прочностные показатели, достигая максимальных значений при содержании БВ – 4% и Melflux – 1,5%. При изгибе она возрастает на 84%, при сжатии на 35%.

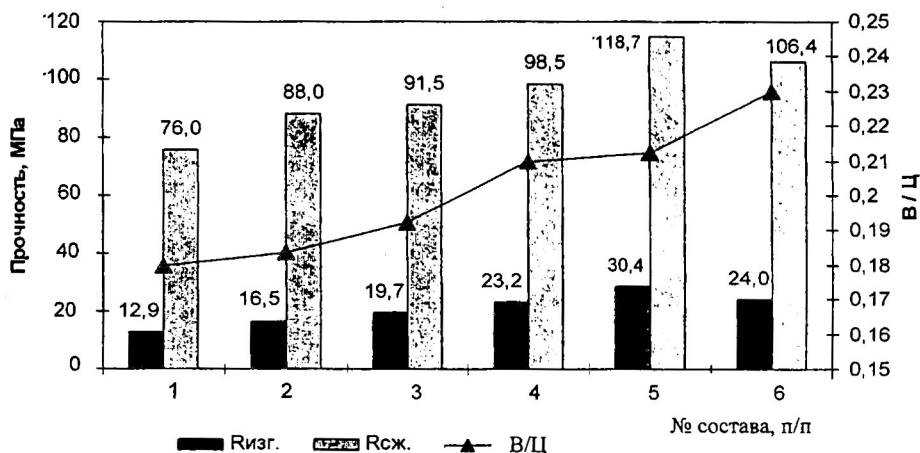


Рис 12. Прочностные показатели тонкозернистого базальтофибробетона.

Для изготовления тонкозернистого базальтофибробетона предложена двухстадийная (двухэтапная) технология. На первой стадии изготавливается механоактивированное композиционное вяжущее с базальтовой фиброй путем смешения-помола в мельнице (шаровой, вибрационной и др.) всех компонентов. Это сухое порошковое вяжущее может быть самостоятельным товарным продуктом. На второй стадии производится фракционированный заполнитель оптимальной granulometрии (рассев — дозирование 4^х фракций кварцевого песка) и его смешение с сухим композиционным вяжущим и водой затворения в обычном лопастном смесителе.

В пятой главе представлены результаты исследований эксплуатационных свойств модифицированного тонкозернистого базальтофибробетона и произведена его технико-экономическая оценка.

Изучено влияние базальтового волокна на линейные деформации усадки тонкозернистого бетона. Получены кривые усадки тонкозернистого бетона с разным содержанием БВ (от 0 до 5%) в процессе нормального твердения до 40 суток. Получены их математические зависимости при разных дозировках базальтового волокна. Кривые описываются уравнениями 3 и 4^й степени. Наибольшее снижение усадки тонкозернистого фибробетона наблюдается при 5% БВ.

Изучены деформативные свойства, в частности зависимость модуля упругости базальтофибробетона от процентного содержания базальтового волокна. Установлено, что при оптимальной дозировке базальтового волокна, равной 4% от массы цемента призмная прочность возрастает на 88%. Коэффициент Пуассона возрастает с 0,21 до 0,42. Диаграммы «напряжение-деформации» при сжатии базальтофибробетона, полученные экспериментальным методом, свидетельствуют о существенном увеличении деформации и работы разрушения (с 2% до 8%). Это предопределяет высокую трещиностойкость и ударную прочность базальтофибробетона по сравнению с обычным бетоном и железобетоном (рис.13).

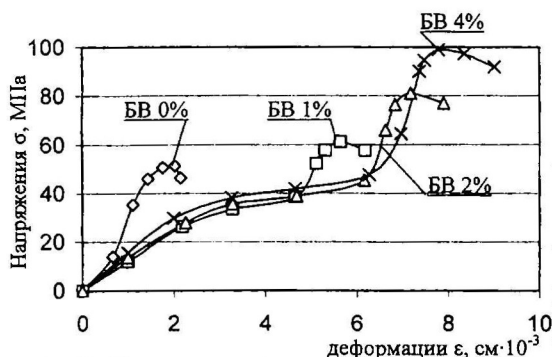


Рис. 13. Диаграмма «деформация-напряжение» (σ - ϵ) тонкозернистого базальтофибробетона с разным содержанием базальтового волокна.

После обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов получена математическая зависимость, показывающая изменение модуля упругости бетона от дозировки базальтового волокна:

$$E_6 = 2,5n^3 - 21n^2 + 64,5n + 420,4; \text{ где } n - \text{процентное содержание волокна от массы цемента. Достоверность аппроксимации } R^2 = 0,9973.$$

Изготовлены опытные образцы надоконных перемычек из базальтофибробетона без стальной арматуры.

Испытания показали, что при 3% базальтового волокна в бетоне, несущая способность этих изделий превосходит проектную в 1,5 раза. Произведенные расчеты экономической эффективности замены стержневого армирования на дисперсное (базальтовым волокном) показали, что себестоимость готовых изделий на 26% ниже себестоимости 1 м^3 железобетонных.

Изготовление буроинъекционных свай усиления фундаментов, показало что использование мелкозернистого базальтофибробетона при их производстве позволяет снизить себестоимость до 19%.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. С целью разработки особовысокопрочного тонкозернистого базальтофибробетона исследовано химическое взаимодействие базальтовых волокон с продуктами гидратации портландцемента путем 3 летней выдержки и кипячения в насыщенном растворе гидрата окиси кальция. Установлено, что прочность на разрыв моноволокна после эквивалентной 10 годам экспозиции в растворе $\text{Ca}(\text{OH})_2$ снижается на 8%, а его армирующее действие на цементный камень — на 10% ниже, чем исходного волокна.

2. Установлено, что введение в цементное вяжущее тонкодисперсных минеральных добавок — микрокремнезема МК-85 и Силинома-ДБС, активности которых в десятки раз выше активности базальтового волокна, позволяет снизить агрессивное влияние извести на базальтовое волокно и предотвратить его ослабление в матрице цементного камня.

3. Установлен оптимальный способ введения базальтового волокна в модифицированное цементное вяжущее путем кратковременного (50-60с) смешения всех компонентов (цемента, суперпластификатора, микрокремнезема и волокна) в мельнице, что обеспечивает не только равномерное распределение волокон в композиционном вяжущем, но и его механоактивацию.

4. Разработан оптимальный состав композиционного цементного вяжущего с коротким (до 9мм) и тонким (10мкм) базальтовым волокном (5% от массы цемента), гиперпластификатором Melflux 2651 (2%) и микрокремнеземом МК-85 (10%). Нормативная (28суточная) прочность на сжатие составляет 184МПа, а при изгибе 27МПа, что в 1,5 и 3,5 раза, соответственно, выше прочности исход-

ного портландцементного камня.

5. Экспериментальным и расчетным методами оптимизирован гранулометрический состав тонкозернистого кварцевого заполнителя, состоящего из четырех фракций (1,25-0,63; 0,63-0,315; 0,315-0,14; 0,14-0,063), имеющего наибольшую объемную плотность (1810 кг/м^3) и минимальную пустотность 31,6%. Тонкозернистый бетон на заполнителе оптимального гранулометрического состава и немодифицированного цемента превосходит бетон на исходном нефракционированном песке по прочности на сжатие в 1,5раза, на изгиб – в 1,9раза. Замена портландцемента ПЦ500Д0 на композиционное вяжущее с базальтовым волокном увеличивает прочность бетона на фракционированном заполнителе при сжатии в 1,5раза, при изгибе – в 2,2раза.

6. Предложена общая технологическая схема изготовления особовысокопрочного базальтофибробетона, включающая отдельное приготовление сухой смеси активированного композиционного вяжущего с дисперсным волокном, фракционированного тонкозернистого заполнителя и финишное смешение этих двух смесевых компонентов (сухого вяжущего и заполнителя) с водой затворения в лопастном смесителе.

7. Предложена топологическая модель распределения базальтового волокна в каркасе тонкозернистого бетона, с учетом максимальной упаковки зерен заполнителя в элементарной кубической ячейке. Произведен расчет количественного содержания волокон в объеме тонкозернистого бетона, совпадающего (с погрешностью 15%) с оптимальной дозировкой волокна (4% от массы вяжущего), полученной из экспериментальных данных.

8. Исследовано влияние базальтового волокна на технологические свойства тонкозернистого бетона с подобранной оптимальной гранулометрией заполнителя. Определены зависимости структурной вязкости систем с различными суперпластификаторами от напряжения сдвига. Установлено, что только гиперпластификатор Melflux снижает вязкость разрушенной структуры фиброцементной композиции, ниже уровня вязкости исходного цементного теста.

9. Установлено существенное влияние базальтовой фибры на деформационные показатели тонкозернистого бетона: линейную усадку при твердении, характер деформирования при нагружении (диаграмма σ - ϵ), модуль упругости и коэффициент Пуассона. Кривые усадки, аппроксимируемые уравнениями 4^{го} порядка, указывают на ее снижение, которое при 5% базальтового волокна достигает 61%. Коэффициент Пуассона возрастает в 2 раза, модуль упругости увеличивается на 20%. Введение базальтового волокна не только повышает разрушающее напряжение, но и меняет характер деформирования бетона, многократно увеличивая долю псевдопластических деформаций при нагружении, и тем самым, работу разрушения, что свойственно всем фиброцементным бетонам и что, в свою очередь предопределяет их высокую ударную прочность.

10. Из тонкозернистого базальтофибробетона изготовлена партия надоконных перемычек 2ПБ-25 (размерами 2460x120x140мм) серии 1.038.1-1в количестве 8шт. Натурные испытания перемычек показали увеличение несущей способности относительно нормативной в 1,5раза. Снижение себестоимости перемычек из базальтофибробетона по сравнению с железобетонными составило

26%. При изготовлении из базальтофибробетона 6 буроинъекционных свай усиления фундаментов жилого дома, за счет увеличения прочности на изгиб в 1,6 раза и прочности на сжатие на 60% было произведено сокращение расхода стальной арматуры на 45% и снижена себестоимость свай на 19%.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

- 1) Боровских И. В., Морозов Н. М., Морозова Н. Н., Хозин В. Г. Комплексный модификатор для дорожных песчаных бетонов. // Теория и практика повышения эффективности строительных материалов: Материалы всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / Под общей редакцией В. И. Калашникова, - Пенза: ПГУАС, 2006. - С.24-27.
- 2) Боровских И.В., Хозин В. Г., Морозова Н.Н. Физико-механические свойства цементного камня, армированного неметаллической фиброй.//Международный сборник научных трудов «Прогрессивные материалы и технологии в современном строительстве». -Новосибирск, 2006-2007. -С.94-97.
- 3) Боровских И.В., Морозов Н.М., Морозова Н.Н., Хозин В.Г. Высокопрочный базальтофибробетон для полов промышленных зданий с тяжелыми режимами эксплуатации // Международный сборник научных трудов «Прогрессивные материалы и технологии в современном строительстве». - Новосибирск, 2007-2008. - С. 102-104.
- 4) Боровских И.В., Морозов Н.М., Хозин В.Г. Оптимизация гранулометрического состава песка для получения высокопрочного тонкозернистого бетона // Известия КазГАСУ, 2008, №2. - С. 121-125.
- 5) И.В. Боровских, В.Г. Хозин. Высокопрочный тонкозернистый бетон, дисперсно-армированный коротковолокнистой базальтовой фиброй. // Инновационные технологии в проектировании и производстве изделий машиностроения (ИТМ-2008). Материалы III Международной научно-практической конференции. Казань, «Новое знание», 2008. - С.44-48.
- 6) Боровских И.В., Хозин В.Г. Исследование влияния способов введения базальтового короткорубленного волокна на прочностные характеристики мелкозернистого бетона. // Строительный комплекс России: Наука, образование, практика: Материалы Международной научно-практической конференции. - Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2008. - С.27-31.
- 7) Боровских И.В., Хозин В.Г. Особенности введения базальтового волокна в цементную матрицу // Материалы международного конгресса «Наука и инновации в строительстве», Современные проблемы строительного материаловедения и технологии, т.1, книга 1 - Воронеж: ВГАСУ, 2008-С.60-65.
- 8) И.В. Боровских, А.П. Васильев, А.Р. Рафагутдинов, В.Г. Хозин. Химическое взаимодействие базальтового волокна с продуктами гидратации цемента. // Теория и практика повышения эффективности строительных материалов: Материалы III Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых учёных / Под общ. ред. В. И. Калашникова. - Пенза: ПГУАС, 2008. - С. 9-12.
- 9) Боровских И.В., Хозин В.Г. Изменение длины базальтовых волокон при получении композиционного вяжущего для высокопрочных базальтофибробетонов // Известия КазГАСУ, 2009, №2 – С. 234-238.

Корректурa автора
Подписано в печать 2.11.2009.
Форм. 60x84 1/16. Печать ризографическая.
Бумага тип №1. Печ. Л. 1,0. Тираж 100. Заказ *607*.

ПМО КГАСУ
420043, Казань, Зеленая, 1

